"亚洲水塔"变化对青藏高原生态系统的影响

底阳平[1,2]　张扬建[1,3,4*]　曾　辉[2,5]　唐　泽[1,4]

1 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室 北京 100101
2 北京大学深圳研究生院 深圳 518055
3 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心 北京 100101
4 中国科学院大学 资源与环境学院 北京 100190
5 北京大学 城市与环境学院 北京 100871

摘要　青藏高原及周边地区作为"亚洲水塔"，拥有广大的冰川、冻土和湖泊，是重要的储水区域，为陆地生态系统提供了最基本的水分资源。生态系统赖以生存的水分资源主要来自自然降水，同时温度的改变会通过调节蒸发散而影响土壤湿度，从而影响生态系统过程。文章从生态系统群落组成和结构，植被物候、覆盖度和生产力，以及生态系统水源涵养功能等多个角度，综述近年来水资源变化给青藏高原生态系统带来的影响，旨在深入了解内部机制，为理论研究和环境治理提供参考。在群落组成和结构方面，水分条件改变引起群落盖度和多样性改变，影响草地群落物种的比例及其相对重要性，进而驱动群落演替。在物候方面，增加季前降水使春季物候提前，生长季降水的增加使秋季物候推迟，季前降水同时调节了物候对温度的响应。植被覆盖度和生产力总体态势为变好，但局部变化存在差异，增温和降水的非协调性变化对植被造成复杂的影响，体现在不同地区的生态控制因子存在差异。水源涵养功能是土壤—植被—大气系统相互作用的结果，受到气候、植被、土壤和人类活动等多种因素影响。在未来需要用系统的思想和方式，关注气候要素和植被覆盖变化对水源涵养量的耦合作用，探究各组分的作用效果和强度。

关键词　气候变化，降水，青藏高原，物候，群落组成，水分条件

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.015

在全球变化背景下，最近几十年来有"亚洲水塔"之称的青藏高原及周边地区，水资源发生了很大的变化，具体表现在冰川融化、降水变化以及湿地面积变化等。此外，青藏高原作为全球增温比较强烈的

*通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20050102）
修改稿收到日期：2019年10月15日

地区，温度升高加速了地表蒸发散，改变了水资源的可利用性，对青藏高原生态系统带来很大的影响[1]。高寒草地是青藏高原最主要的植被类型，对水分的响应比其他生态系统（如森林）更加敏感。在各类水资源当中，对生态系统影响最大的是自然的降水。降水格局变化是全球气候变化的重要内容，包括降水量变化、降水季节分布变化以及降水间隔的变化等。青藏高原范围巨大、地形多样、地表物理性质复杂，自然降水在时空格局方面均表现出显著的变化差异。在时间上，冬季和春季降水显著增加，而夏季和秋季降水无显著下降。在空间上，由于季风和西风带的作用，青藏高原东北部、中部和西南部地区的年降水量逐年增加，而东南部年降水量呈现出逐年下降的趋势[2]（图1）。降水格局变化给植被生态系统的动态发展带来了诸多不确定性，目前已开展较多的研究，从不同角度对降水影响的内部作用机制进行探讨，但是结论仍缺乏系统性和整体性。本文旨在从植被群落组成和结构、植被物候、植被覆盖度与生产力和水源涵养功能等方面，阐述青藏高原植被对降水格局变化的响应过程，以期更加深入地理解未来降水格局变化对青藏高原生态系统关键过程的影响。

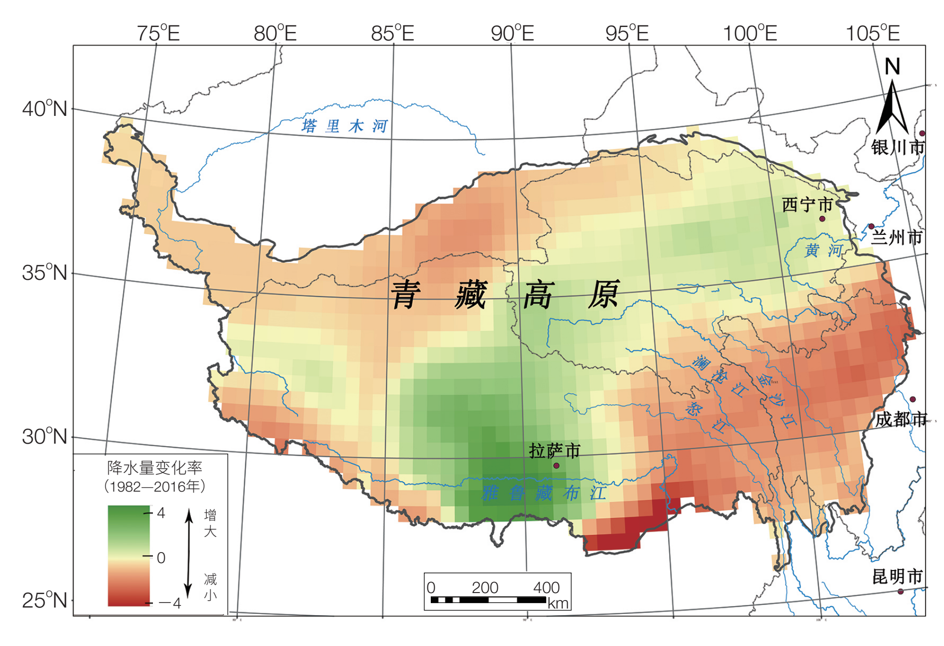


图1 1982—2016年青藏高原降水变化趋势

1 水分条件改变对植物群落组成和结构的影响

降水通过调节土壤水分含量间接影响植物群落的组成和结构。目前研究发现，不同类型的植物群落对降水格局变化的响应规律存在差异[3,4]。在增温条件下，土壤微环境水分随之改变，进而间接影响植物的生长[5]。增温造成的干旱胁迫是影响植物群落物种数量和盖度的主要因素。随着温度升高，藏北高寒草甸群落物种数量逐渐减少，浅根植物因抗旱能力差，较深根植物对增温响应更为强烈，数量减少得更多[6]。降水变化不仅对干旱、半干旱地区植物群落影响显著，也可能影响相对湿润的地区。在紫花针茅为优势种的高寒草原中，禾草类植物地上生物量在降水的促进下显著增长，从而引起群落盖度的增加[7]。然而，青藏高原物种多样性对降水的响应情况目前结论仍不一致。部分研究指出，在青藏高原高寒草甸和高寒草原地区生长季降水较温暖指数对物种丰富度的影响更大[8]，随着降水增加，植物群落物种多样性有不同程度的提高。也有研究表明，降水变化对多样性影响并不显著，降水变化并未改变物种多样性[9]。这可能是因为高寒草原的高蒸发量使得水分无法满足植物的需求量，而降水的短期动态波动可能会影响实验结果[10]。降水通过影响土壤水分，间接调节植物群落生长，具有一定滞后效应和累积效应，造成了观测结果的不一致性[11]。因此，确定合适的时间尺度对准确预测降水格局改变下植物群落变动情况至关重要，亟待开展长期定位观测试验。

除关注青藏高原单个站点外，空间尺度的研究也不容忽视。藏北高原高寒草地样带横跨羌塘高

原东、中、西部，涵盖高寒草原、高寒草甸和高寒荒漠等植被群落类型[12]，样带尺度上的物种丰富度和多样性与降水呈指数型增长关系，降水增加有利于群落结构优化。高寒草地生态系统对气候变化的敏感性可能在很大程度上源于降水时空格局的变化，降水格局的改变造成土壤水分、养分分布的空间异质性，从而影响草地群落物种的比例及其相对重要性，驱动群落演替的方向和过程[13]。未来降水格局的改变很可能会对水分敏感地区的群落物种组成和结构产生深远的影响[14]。

2 降水格局变化对植被物候的影响

降水格局变化会影响植被节律，同时植被自身也会对环境变化作出响应。物候对上述两者的作用关系具有很好的指示作用[15]。关于降水对青藏高原植被物候的影响，目前仍存在争议。主要原因有2个：① 青藏高原地域广大，监测站点少，地面物候观测的相关研究较少[16]。② 青藏高原属于气候寒冷的干旱、半干旱地区，物候对水分条件较为敏感，同时植被生长和物候的变化受温度的控制较为强烈，降水和温度的共同作用使该问题更加复杂。

基于青藏高原近30年间草本植物返青期的物候记录数据，发现返青期显著提前的站点多分布在青藏高原东北部，也有部分站点返青期延迟。此外，位于较低海拔处的物候变化较高海拔地区更为明显。与利用meta方法[17]分析的全球尺度站点物候数据进行比较，发现青藏高原地区春季物候的提前趋势较小。然而这些差异并不能说明青藏高原植被物候对气候变暖的响应敏感性不如世界其他地区。由于各站点观测物种数量少且不一致，以上2项研究观测都不充分，仅依靠站点物候观测数据很难准确揭示整个青藏高原的物候的时空变化规律[18]。

遥感手段为区域大尺度的研究提供了有效工具。近30年来，生长季开始日期（start of season，SOS）在整体时间段没有明显变化，但前后时段内的变化趋势发生改变。高原植被平均SOS在2000年前每10年提前4—10天[19]；在2000年后，青藏高原的SOS平均值没有显著变化[20]。在经历寒冷冬季或休眠期的地区，春季植被生长启动需要达到一定温度以打破生态休眠[21]。然而温度的持续升高并不一定使SOS提前。例如，2000—2011年，青藏高原整个区域温度升高，但青藏高原西南部地区的SOS明显延迟。气候变暖趋势与SOS趋势之间的不匹配，可能是由这一时期季前降水减少[22]或者蒸散作用增强造成的。增加季前降水可以使青藏高原大部分地区的SOS提前[23]；同时，降水也会影响青藏高原生长季结束日期（end of season，EOS），随着生长季降水的增加EOS推迟[24]。综合植被物候开始和结束时期的相关研究结论表明，青藏高原生长季长度的变化主要来自SOS的变化[25]。此外，季前降水也调节了SOS对温度的响应，使SOS对较湿润地区的温度更为敏感，而干旱地区的SOS对季前降水更加敏感。根据上述发现，预期温暖和湿润的气候条件将会使SOS提前、EOS延迟，从而延长未来青藏高原的生长期。温度和降水对植物物候的影响具有滑动窗口效应[26]，对不同地区、不同类型的植被物候造成本质上的差异。

3 降水格局变化对植被覆盖度和生产力的影响

归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）多被用作表征植被覆盖程度。从20世纪80年代至今，青藏高原区域植被覆盖度总体为变好的态势，但局部变化趋势存在差异（图2）。多数学者以1998年为分界线展开研究分析。在1998年以前，青藏高原的草地覆盖度均呈现出显著提升，东部提升速率大于西南部，夏季温度和春季降水共同作用促进了草地植被生长。夏季温度提升导致土壤温度增加，从而加速土壤有机质分解和营养元素释放。同

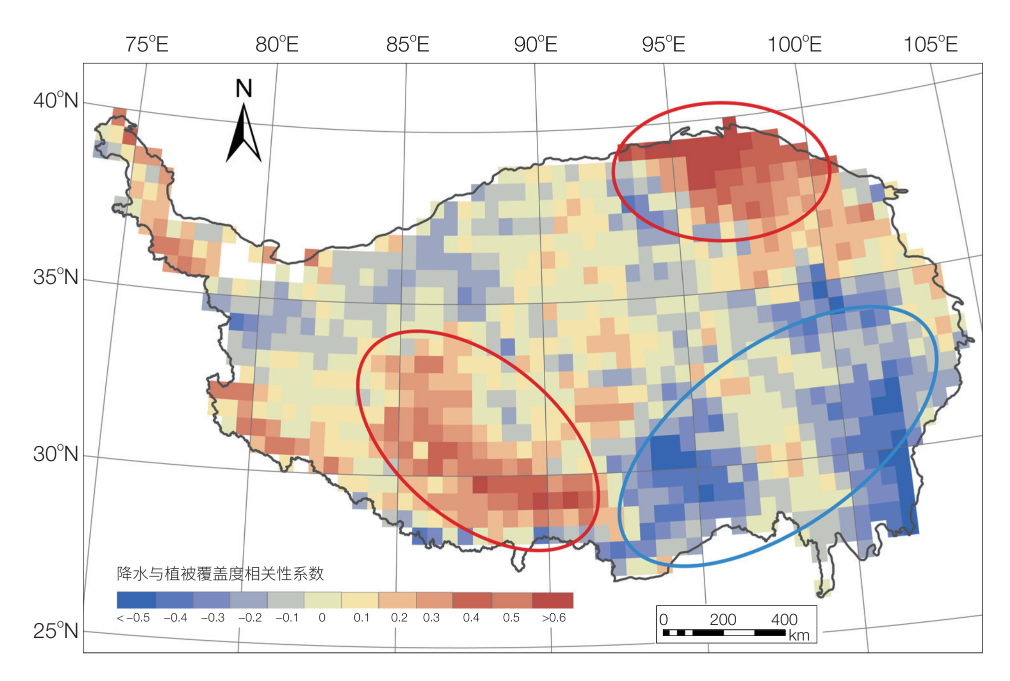


图 2　青藏高原降水与植被覆盖度相关性空间分布

时，研究发现植被夏季 NDVI 与春季降水显著相关，可能的原因是降水对覆盖度的影响具有滞后性，春季降水通过影响土壤水分进而作用于植被物候。1998 年以后，青藏高原的草地覆盖度整体上呈较小的增加趋势，仅青藏高原东部地区的显著增加，在西南的小部分地区表现为显著减少。降水量和热量条件均是高原植被生长的影响因素，但是在该阶段，降水对植被覆盖的影响较气温更为显著[27]。1998 年前后，降水量的改变使得降水成为干旱、半干旱地区植被覆盖度的控制因子[28]。此外，植被覆盖度和气候要素两者的关系在空间上异质性高。在以唐古拉山为界的东北部地区，气温对植被覆盖度的驱动作用明显大于降水；在西南地区，则表现为降水的驱动作用大于气温[29]。但是需要注意的是，由于青藏高原气象观测站点主要位于高原中东部，高原西部大多数区域没有站点或者站点很少，研究结论的适用性局限于高原中东部。

生态系统净初级生产力（net primary productivity，NPP）是衡量植物生物量增长情况的指标，反映出植被生长条件的变化。目前，针对青藏高原生产力变化在大尺度监测、样地调查、定点观测、野外试验等方面都有了比较系统的研究。

大尺度监测研究结果表明，青藏高原区植被 NPP 在过去近 30 年表现出增加的趋势[30]。气候因素对环境的影响远高于人为生态修复的效果，且降水在生态过程中的作用越来越重要。增加降水为处于气候持续变暖和水资源有限背景下的生态系统提供充足的水供应，有利于植被生长。在空间格局方面，NPP 在青藏高原西部和北部呈下降趋势，而在东南部逐年上升，显著增加的 NPP 主要发生在青藏高原中东部，且增加量多于减少量 [31]。增温和降水的非协调性变化是植被生产力空间格局分布复杂的主要原因，体现在不同地区的生态控制因子存在差异[32]。有研究指出，青海、西藏草地NPP 的主要气候驱动因子不同：青海草地 NPP 的主要气候驱动因子为气温，而西藏草地 NPP 的主要气候驱动因子为降水。在青海高寒草甸和西藏暖草甸等地区，温度是水分充足条件下的主要限制因子[33]。

大量的野外样方调查同样发现，受气候变暖影响，青藏高原不同植被类型生物量变化表现为不一致的上升趋势。生长季内温度的升高使矮嵩草草甸发育速率加快并提早成熟，但其实际生长期缩短，限制了干物质积累，导致生物量减少，并且冬季升温后土壤水分散失，保墒能力减弱，牧草年产量下降[34]。在样带尺度上，根据水热条件变化梯度，从青藏高原东南部到西部进行横跨整个藏北高原的样地调查，揭示了区域水热环境梯度下高寒植被的响应及适应性[35]。在站点观测尺度上，对高寒植被生态系统 CO_2 排放、净

交换以及碳循环过程中的水分利用效率也进行了相关研究[36]。

4 降水格局变化对生态系统水源涵养的影响

水源涵养功能作为生态系统的重要服务功能之一，在生态学界备受关注。提升生态系统的水源涵养能力，在时间上能够解决河流水量在洪水期和枯水期分配不均的问题[37]；在空间上，起到调节地表径流、土壤径流和地下径流分配的作用[38]。水源涵养功能是土壤—植被—大气系统相互作用的结果[39]，受到气候、植被、土壤和人类活动等多种因素影响（图3）。青藏高原是我国主要河流——长江、黄河、澜沧江的发源地，具有极其重要的水源涵养功能。该地区的径流形成和下泄对我国西部地区和华北地区生态系统的维持与人类的生存都有至关重要的支撑作用[40]。近年来，在气候变化和人类活动的影响下，该地区出现了一系列生态环境问题，高原水源涵养能力也随之发生变化。

降水和潜在蒸散变化是直接影响生态系统水源涵养量增减的主要气候要素，两者共同作用导致水源涵养功能发生变化[41]。河流径流量变化能较好地反映出水源涵养功能的水平，虽然降水和融水是径流量的主要水供给来源，但是受到蒸散作用的影响，降水量变化对径流量的改变作用具有明显的空间差异。以三江源地区为例，从20世纪50年代至今，长江源区绝大部分河段的降水量和径流深均呈显著增加趋势；澜沧江源区降水量显著增加，径流深却无显著变化；黄河源区内部差异很大，降水量呈增加或无变化趋势，径流深则呈无变化或显著减少趋势[42]。此外，在干湿条件不同的地区，降水和蒸散的影响程度也存在差异。在黄河源区东南部的半湿润地区，水源涵养量减少主要受降水减少和蒸散增加的共同影响；在北部半干旱地区，水源涵养量增加主要是降水量增加的结果。随着全球气温不断升高，自20世纪90年代末以来，许多地区潜在蒸散有所增加[43]，青藏高原水源涵养量存在进一步降低的风险。

除气候条件外，植被类型与覆盖度、土壤特性的改变也对实际蒸散和水源涵养的变化产生一定作用。植被和土壤性质的改变主要受到人类活动的影响。近年来，过度放牧和啮齿动物破坏，造成高寒草原退化严重[44]。虽已开展了一系列生态恢复工程，但是目前对此类工程的生态恢复成效仍不明晰。已有研究表明，长江源区的生态恢复工程促进了地表蒸散过程，减少丰水期径流量，但同时大气环流变化引起了降水增强，径流量又得到补充，抵消了蒸散作用导致的径流减少，因此径流量仍然表现为增加[45]。由于生态过程关系复杂、结果难以量化，因而长期监测青藏高原所有流域的长期径流变化特征是有必要的，有助于深

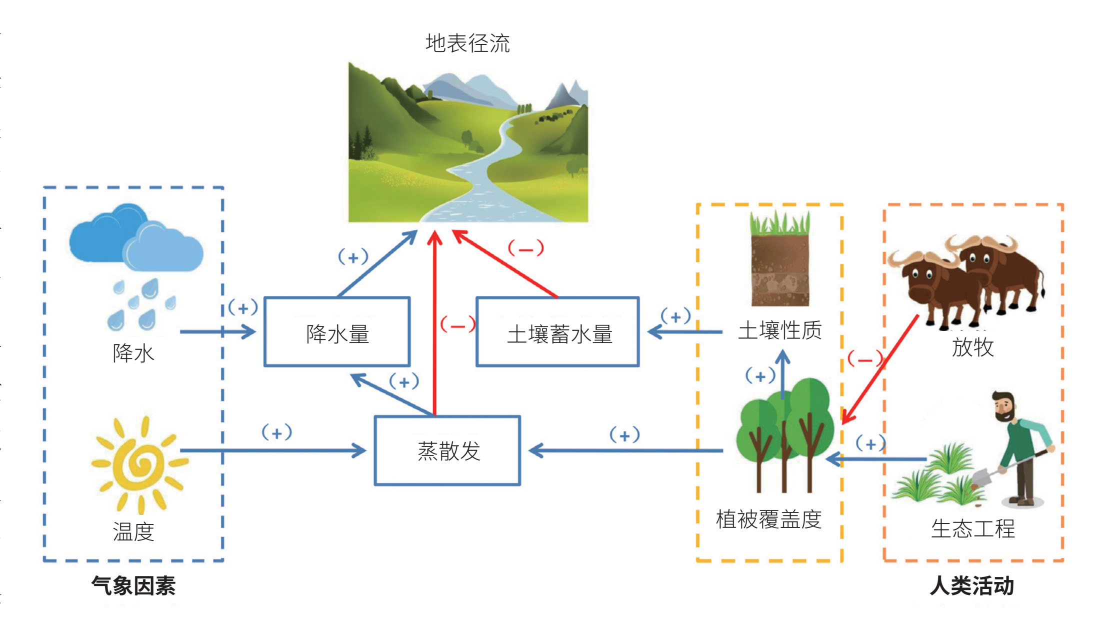


图3 水源涵养功能的土壤–植被–大气系统促进（+）或抑制（–）作用

入了解该变化的空间模式。越来越多的证据表明，植被可以通过反馈机制调节地表和大气之间的蒸散[46]，进而影响局部降水，调节径流变化。降水中的同位素组成也表明，青藏高原具有较高的水回收量[47]。因此，研究局部地区的植被-降水反馈系统的内部机制，对青藏高原地区的水源涵养功能具有重要意义。

在全球变化背景下，气候要素和植被覆盖变化对水源涵养量的耦合作用，以及生态系统水源涵养量变化的驱动机制还需要进行深入研究。模型为更准确地模拟陆地表面和大气之间的生物物理耦合提供了途径。分近期、中期和远期模拟青藏高原生态功能保护区水源涵养功能的动态变化，未来气候变化对各生态功能区的水源涵养功能的影响存在较为明显的空间差异。近期水源涵养功能的提高主要受降水量增加的影响。而在中期和远期，主要影响因子为水分实际蒸散。随着温度升高，实际蒸散增幅加大，尽管降水量也有所增加，但生态系统水源涵养功能仍以减弱为主。

5 结语

青藏高原在我国的地理区划上属于寒区，但由于平均年降水量不超过 500 mm；同时，强辐射导致的蒸发消耗了大部分的天然降水，水分条件优势不明显。因此，水分条件的改变必然对青藏高原植被系统会带来很大的影响。在全球变化背景下，青藏高原总体上属于变暖、变湿，但该趋势包含着较高的空间异质性。在气候条件驱动下，青藏高原植被总体趋好，具体表现为生长季开始期提前、植被覆盖度提高、生态系统生产力提升。但升温及其导致的水分条件的变化对于群落结构和组成的影响还有待进一步研究。植被发生系列变化后，其也会通过改变土壤的含水能力而影响各地的水分环境条件，也即反馈到环境。在自然及人为生态工程的双重驱动下，青藏高原植被生长总体趋好，生态系统地表涵养水能力也得到了普遍提高，这些都为青藏高原发挥“亚洲水塔”功能的提升打下了基础。

参考文献

1 段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 等. 青藏高原南北降水变化差异研究. 冰川冻土, 2008, 30(5): 726-732.

2 Gao Q Z, Guo Y, Xu H, et al. Climate change and its impacts on vegetation distribution and net primary productivity of the alpine ecosystem in the Qinghai-Tibetan Plateau. Science of the Total Environment, 2016, 554-555: 34-41.

3 Yang H J, Wu M Y, Liu W X, et al. Community structure and composition in response to climate change in a temperate steppe. Global Change Biology, 2015, 17(1): 452-465.

4 Yang Z, Zhang Q, Su F, et al. Daytime warming lowers community temporal stability by reducing the abundance of dominant, stable species. Global Change Biology, 2017, 23(1): 154-163.

5 Ma Z, Yuan, Liu H Y, Mi Z R, et al. Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production. Nature Communications, 2017, 8(8): 15378.

6 李军祥, 张扬建, 朱军涛, 等. 藏北高山嵩草草甸群落特征及生产力对模拟增温幅度的响应. 生态学报, 2019, 39(2): 474-485.

7 Gough L, Osenberg C W, Gross K L, et al. Fertilization effects on species density and primary productivity in herbaceous plant communities. Oikos, 2000, 89(3): 428-439.

8 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 2006, 30(1): 1-8.

9 李长斌, 彭云峰, 赵殿智, 等. 降水变化和氮素添加对青藏高原高寒草原群落结构和物种多样性的影响. 水土保持研究, 2016, 23(6): 185-191.

10 Xu Z W, Wan S Q, Ren H Y, et al. Effects of water and nitrogen addition on species turnover in temperate grasslands in northern China. PLoS One, 2012, 7(6): e39762.

11 周国逸, 闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响. 生态学报, 2001, 12(12): 2002-2012.

12 武建双, 李晓佳, 沈振西. 藏北高寒草地样带物种多样性沿降水梯度的分布格局. 草业学报, 2012, 21(3): 17-25.

13 杨兆平, 欧阳华, 宋明华, 等. 青藏高原多年冻土区高寒植被物种多样性和地上生物量. 生态学杂志, 2010, 29(4): 617-623.

14 Robertson T R, Zak J C,Tissue D T. Precipitation magnitude and timing differentially affect species richness and plant density in the sotol grassland of the Chihuahuan Desert. Oecologia, 2010, 162(1): 185-197.

15 Bradley N L, Leopold A C, Ross J, et al. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. PNAS, 1999, 96(17): 9701-9704.

16 Chen X Q, An S, Inouye D W, et al. Temperature and snowfall trigger alpine vegetation green-up on the world's roof. Global Change Biology, 2015, 21(10): 3635-3646.

17 Parmesan C,Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature, 2003, 421(6918): 37-42.

18 刘瑶杰. 青藏高原草地对气候变化的响应及对近地面气候的反馈. 北京: 中国科学院大学, 2018.

19 Piao S L, Cui M D, Chen A P, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau. Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1599-1608.

20 Ding M J, Li L H, Zhang Y L, et al. Start of vegetation growing season on the Tibetan Plateau inferred from multiple methods based on GIMMS and SPOT NDVI data. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(2): 131-148.

21 Milwaukee K. Plant development models//Phenology: An Integrative Environmental Science. Dordrecht: Springer, 1999.

22 Shen M G, Piao S L, Dorji T, et al. Plant phenological responses to climate change on the Tibetan Plateau: Research status and challenges. National Science Review, 2015, 2(4): 454-467.

23 Shen M G, Piao S L, Cong N, et al. Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau. Global Change Biology, 2015, 21(10): 3647-3656.

24 Liu Q, Fu Y H, Zeng Z, et al. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. Global Change Biology, 2016, 22(2): 644-655.

25 Che M L, Chen B Z, Innes J L, et al. Spatial and temporal variations in the end date of the vegetation growing season throughout the Qinghai-Tibetan Plateau from 1982 to 2011. Agricultural & Forest Meteorology, 2014, 189-190(189): 81-90.

26 Cong N, Shen M G, Yang W, et al. Varying responses of vegetation activity to climate changes on the Tibetan Plateau grassland. International Journal of Biometeorology, 2017, 61(8): 1433-1444.

27 卓嘎, 陈思蓉, 周兵. 青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2018, 38(9): 3208-3218.

28 Jian S, Qin X, Yang J. The response of vegetation dynamics of the different alpine grassland types to temperature and precipitation on the Tibetan Plateau. Environmental Monitoring & Assessment, 2016, 188(1): 1-11.

29 Jian T, Zhang Y, Dong J, et al. Elevation-dependent relationships between climate change and grassland vegetation variation across the Qinghai-Xizang Plateau. International Journal of Climatology, 2015, 35(7): 1638-1647.

30 张镱锂, 祁威, 周才平, 等. 青藏高原高寒草地净初级生产力（NPP）时空分异. 地理学报, 2014, 68(2): 1197-1211.

31 Chen B X, Zhang X Z, Tao J, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. Agricultural & Forest Meteorology, 2014, 189-190(189): 11-18.

32 Molnar P, Boos W R, Battisti D S. Orographic controls on climate and paleoclimate of Asia: thermal and mechanical roles for the Tibetan Plateau. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 2010, 38(1): 77-102.

33 Piao S L, Tan K, Nan H J, et al. Impacts of climate and CO_2 changes on the vegetation growth and carbon balance of Qinghai-Tibetan grasslands over the past five decades. Global & Planetary Change, 2012, 98-99(6): 73-80.

34 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析. 高原气象, 2004, 23(4): 558-567.

35 Yang Y H, Fang J Y, Ji C J, et al. Above- and belowground biomass allocation in Tibetan grasslands. Journal of Vegetation Science, 2009, 20(1): 177-184.

36 张宪洲, 石培礼, 刘允芬, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤CO_2排放及其碳平衡. 中国科学: 地球科学, 2004, 34(s2): 193-199.

37 聂忆黄, 龚斌, 衣学文. 青藏高原水源涵养能力评估. 水土保持研究, 2009, 16(5): 210-212.

38 李士美, 谢高地. 草甸生态系统水源涵养服务功能的时空异质性. 中国草地学报, 2015, 37(2): 88-93.

39 尹云鹤, 吴绍洪, 李华友, 等. SRES情景下青藏高原生态功能保护区水源涵养功能的变化研究. 资源科学, 2013, 35(10): 2003-2010.

40 孙永寿, 段水强, 李燕, 等. 近年来青海三江源区河川径流变化特征及趋势分析. 水资源与水工程学报, 2015, (1): 52-57.

41 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 过去30年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响. 地理研究, 2016, 35(1): 49-57.

42 张岩, 张建军, 张艳得, 等. 三江源区径流长期变化趋势对降水响应的空间差异. 环境科学研究, 2017, 30(1): 40-50.

43 Abouabdillah A, White M, Arnold J G, et al. Evaluation of soil and water conservation measures in a semi-arid river basin in Tunisia using SWAT. Soil Use and Management, 2015, 30(4): 539-549.

44 Yang X, Jia Z, Ci L. Assessing effects of afforestation projects in China. Nature, 2010, 466(7304): 315.

45 Li J, Liu D, Wang T, et al. Grassland restoration reduces water yield in the headstream region of Yangtze River. Scientific Reports, 2017, 7(1): 2162.

46 Shen M G, Piao S L, Jeong S-J, et al. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth. PNAS, 2015, 112(30): 9299-9304.

47 Liu J, Xu X, Shao Q. Grassland degradation in the "Three-River Headwaters" region, Qinghai Province. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(3): 259-273.

Effects of Changed Asian Water Tower on Tibetan Plateau Ecosystem: A Review

DI Yangping[1,2] ZHANG Yangjian[1,3,4*] ZENG Hui[2,5] TANG Ze[1,4]

(1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China;

3 CAS Center of Excellent in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;

4 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

5 College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract As the “water tower” of Asia, the Tibetan Plateau provides basic water resources for the regional ecosystems. Among the variety of water resources, natural precipitation is most relevant to ecosystems, and temperature also affects soil moisture availability by regulating evapotranspiration, thus affecting ecosystem process. From the aspects of community composition and structure, vegetation phenology, coverage and productivity, and water conservation function by ecosystems, this paper reviewed the series of impacts caused by changed water resources on the Tibetan Plateau ecosystems in recent years, and the underlying mechanism was further revealed. The shifted water conditions led to changes in community coverage, species diversity, and relative importance of each species, thereby driving community succession. The strengthened preseason precipitation advanced spring phenology, and postponed autumn phenology. The preseason precipitation also adjusted the responses of vegetation phenology to temperature. Under global changes, the vegetation coverage increased and ecosystem productivity strengthened on the Tibetan Plateau, but with high spatial heterogeneities. The incongruous changes of temperature and precipitation complicated their effects on vegetation, as exhibited by their distinct relative determination effects in different areas. Water conservation by ecosystems stems from interactions among soil-vegetation-atmosphere, which is influenced by climate, vegetation, soil, human activities, etc. The future studies need to pay mounting attentions to the coupling effects of climates and vegetation cover on water conservation of ecosystems, and also attribute the separate contribution from each factor.

Keywords climate change, precipitation, Tibetan Plateau, phenology, community composition, water



底阳平 北京大学深圳研究生院硕士研究生。研究方向为全球变化生态学。E-mail: dyp7619@pku.edu.cn

DI Yangping Postgraduate student in Peking University Shenzhen Graduate School. Her research is mainly focused on global change ecology. E-mail: dyp7619@pku.edu.cn

* Corresponding author



张扬建 中国科学院地理科学与资源研究所研究员，中国科学院拉萨高原生态试验站站长。中国地理学会生物地理分会副主任。国家杰出青年科学基金获得者，中国科学院“百人计划”、中组部“万人计划”中青年科技领军人才。研究方向主要为结合遥感、模型和控制实验来揭示生态系统对全球变化的响应和适应，为生态环境保护提供理论决策依据。迄今已发表SCI论文60余篇。E-mail: zhangyj@igsnrr.ac.cn

ZHANG Yangjian Research Professor of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS), Director of Lhasa Alpine Ecological Station, Deputy Director of Biogeography Branch of Chinese Geographical Society. Dr. Zhang earned Ph.D. from the University of Georgia, USA. He was selected as “Hundred Talent Program” of CAS in 2009, awarded the National Talent Program “Ten Thousand Talent Program” in 2016, and awarded the Distinguished Young Scholar of the National Natural Science Foundation of China in 2017. His research is mainly focused on application of remote sensing, ecological modeling and manipulative experiments to investigate response and adaption of ecosystems to global changes, and the research findings are naturally integrated with government policy making. Until now, Dr. Zhang has published over 60 papers indexed by SCI. E-mail: zhangyj@igsnrr.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

参考文献（双语版）

1 段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 等. 青藏高原南北降水变化差异研究. 冰川冻土, 2008, 30(5): 726-732.
Duan K Q, Yao T D, Wang N L, et al. The difference in precipitation variability between the north and south Tibetan Plateaus. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 726-732. (in Chinese)

2 Gao Q Z, Guo Y, Xu H, et al. Climate change and its impacts on vegetation distribution and net primary productivity of the alpine ecosystem in the Qinghai-Tibetan Plateau. Science of the Total Environment, 2016, 554-555: 34-41.

3 Yang H J, Wu M Y, Liu W X, et al. Community structure and composition in response to climate change in a temperate steppe. Global Change Biology, 2015, 17(1): 452-465.

4 Yang Z, Zhang Q, Su F, et al. Daytime warming lowers community temporal stability by reducing the abundance of dominant, stable species. Global Change Biology, 2017, 23(1): 154-163.

5 Ma Z, Yuan, Liu H Y, Mi Z R, et al. Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production. Nature Communications, 2017, 8(8): 15378.

6 李军祥, 张扬建, 朱军涛, 等. 藏北高山嵩草草甸群落特征及生产力对模拟增温幅度的响应. 生态学报, 2019, 39(2): 474-485.
Li J X, Zhang Y J, Zhu J T, et al. Responses of community characteristics and productivity to a warming gradient in a Kobresia pygmaea meadow of Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 474-485. (in Chinese)

7 Gough L, Osenberg C W, Gross K L, et al. Fertilization effects on species density and primary productivity in herbaceous plant communities. Oikos, 2000, 89(3): 428-439.

8 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 2006, 30(1): 1-8.
Yang Y H, Piao S L. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 1-8. (in Chinese)

9 李长斌, 彭云峰, 赵殿智, 等. 降水变化和氮素添加对青藏高原高寒草原群落结构和物种多样性的影响. 水土保持研究, 2016, 23(6): 185-191.
Li C B, Peng Y F, Zhao D Z, et al. Effects of precipitation change and nitrogen addition on community structure and plant diversity in an alpine steppe on the Qinghai-Tibetan Plateau. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 185-191. (in Chinese)

10 Xu Z W, Wan S Q, Ren H Y, et al. Effects of water and nitrogen addition on species turnover in temperate grasslands in northern China. PLoS One, 2012, 7(6): e39762.

11 周国逸, 闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响. 生态学报, 2001, 12(12): 2002-2012.
Zhou G Y, Yan J H. The influences of regional atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2001, 12(12): 2002-2012. (in Chinese)

12 武建双, 李晓佳, 沈振西. 藏北高寒草地样带物种多样性沿降水梯度的分布格局. 草业学报, 2012, 21(3): 17-25.
Wu J S, Li X J, Shen Z X. Species diversity distribution pattern of alpine grasslands communities along a precipitation gradient across northern Tibetan Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(3): 17-25. (in Chinese)

13 杨兆平, 欧阳华, 宋明华, 等. 青藏高原多年冻土区高寒植被物种多样性和地上生物量. 生态学杂志, 2010, 29(4): 617-623.
Yang Z P, Ouyang H, Song M H, et al. Species diversity and above-ground biomass of alpine vegetation in permafrost region of Qinghai-Tibetan Plateau. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(4): 617-623. (in Chinese)

14 Robertson T R, Zak J C,Tissue D T. Precipitation magnitude and timing differentially affect species richness and plant density in the sotol grassland of the Chihuahuan Desert. Oecologia, 2010, 162(1): 185-197.

15 Bradley N L, Leopold A C, Ross J, et al. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. PNAS, 1999, 96(17): 9701-9704.

16 Chen X Q, An S, Inouye D W, et al. Temperature and snowfall trigger alpine vegetation green-up on the world's roof. Global Change Biology, 2015, 21(10): 3635-3646.

17 Parmesan C,Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature, 2003, 421(6918): 37-42.

18 刘瑶杰. 青藏高原草地对气候变化的响应及对近地面气候的反馈. 北京: 中国科学院大学, 2018.
Liu Y J. Response of Qinghai-Tibet Plateau grassland to climate change and feedback to near-surface climate. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)

19 Piao S L, Cui M D, Chen A P, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau. Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1599-1608.

20 Ding M J, Li L H, Zhang Y L, et al. Start of vegetation growing season on the Tibetan Plateau inferred from multiple methods based on GIMMS and SPOT NDVI data. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(2): 131-148.

21 Milwaukee K. Plant development models// Phenology: An Integrative Environmental Science. Dordrecht: Springer, 1999.

22 Shen M G, Piao S L, Dorji T, et al. Plant phenological responses to climate change on the Tibetan Plateau: Research status and challenges. National Science Review, 2015, 2(4): 454-467.

23 Shen M G, Piao S L, Cong N, et al. Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau. Global Change Biology, 2015, 21(10): 3647-3656.

24 Liu Q, Fu Y H, Zeng Z, et al. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. Global Change Biology, 2016, 22(2): 644-655.

25 Che M L, Chen B Z, Innes J L, et al. Spatial and temporal variations in the end date of the vegetation growing season throughout the Qinghai-Tibetan Plateau from 1982 to 2011. Agricultural & Forest Meteorology, 2014, 189-190(189): 81-90.

26 Cong N, Shen M G, Yang W, et al. Varying responses of vegetation activity to climate changes on the Tibetan Plateau grassland. International Journal of Biometeorology, 2017, 61(8): 1433-1444.

27 卓嘎，陈思蓉，周兵. 青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2018, 38(9): 3208-3218.
Zhuo G, Chen S R, Zhou B. Spatio-temporal variation of vegetation coverage over the Tibetan Plateau and its responses to climatic factors. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3208-3218. (in Chinese)

28 Jian S, Qin X, Yang J. The response of vegetation dynamics of the different alpine grassland types to temperature and precipitation on the Tibetan Plateau. Environmental Monitoring & Assessment, 2016, 188(1): 1-11.

29 Jian T, Zhang Y, Dong J, et al. Elevation-dependent relationships between climate change and grassland vegetation variation across the Qinghai-Xizang Plateau. International Journal of Climatology, 2015, 35(7): 1638-1647.

30 张镱锂, 祁威, 周才平, 等. 青藏高原高寒草地净初级生产力（NPP）时空分异. 地理学报, 2014, 68(2): 1197-1211.
Zhang Y L, Qi W, Zhou C P, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production (NPP) of alpine grassland on Tibetan Plateau from 1982 to 2009. Acta Geographica Sinica, 2014, 68(2): 1197-1211. (in Chinese)

31 Chen B X, Zhang X Z, Tao J, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. Agricultural & Forest Meteorology, 2014, 189-190: 11-18.

32 Molnar P, Boos W R, Battisti D S. Orographic controls on climate and paleoclimate of Asia: Thermal and mechanical roles for the Tibetan Plateau. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 2010, 38(1): 77-102.

33 Piao S L, Tan K, Nan H J, et al. Impacts of climate and CO_2 changes on the vegetation growth and carbon balance of Qinghai-Tibetan grasslands over the past five decades. Global & Planetary Change, 2012, 98-99(6): 73-80.

34 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析. 高原气象, 2004, 23(4): 558-567.

Li Y N, Zhao X Q, Cao G M, et al. Analyses on climates and vegetation productivity background at Haibei alpine meadow ecosystem research station. Plateau Meteorology, 2004, 23(4): 558-567. (in Chinese)

35 Yang Y H, Fang J Y, Ji C J, et al. Above- and belowground biomass allocation in Tibetan grasslands. Journal of Vegetation Science, 2009, 20(1): 177-184.

36 张宪洲, 石培礼, 刘允芬, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤CO_2排放及其碳平衡. 中国科学：地球科学, 2004, 34(s2): 193-199.

Zhang X Z, Shi P L. Liu Y F, et al. Soil CO_2 emission and carbon balance in alpine steppe ecosystem on the Qinghai-Tibet Plateau. Scientia Sinica (Terrae), 2004, 34(s2): 193-199. (in Chinese)

37 聂忆黄, 龚斌, 衣学文. 青藏高原水源涵养能力评估. 水土保持研究, 2009, 16(5): 210-212.

Nie Y H, Gong B, Yi X W. Water conservation valuation of Qinghai-Tibet Plateau. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(5): 210-212. (in Chinese)

38 李士美, 谢高地. 草甸生态系统水源涵养服务功能的时空异质性. 中国草地学报, 2015, 37(2): 88-93.

Li S M, Xie G D. Spatial and temporal heterogeneity of water conservation service for meadow ecosystem. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(2): 88-93. (in Chinese)

39 尹云鹤, 吴绍洪, 李华友, 等. SRES情景下青藏高原生态功能保护区水源涵养功能的变化研究. 资源科学, 2013, 35(10): 2003-2010.

Yin Y H, Wu S H, Li H Y, et al. Water conservation function changes in ecological reserves on the Tibetan Plateau under SRES scenarios. Resources Science, 2013, 35(10): 2003-2010. (in Chinese)

40 孙永寿, 段水强, 李燕, 等. 近年来青海三江源区河川径流变化特征及趋势分析. 水资源与水工程学报, 2015, (1): 52-57.

Sun Y S, Duan S Q, Li Y, et al. Variation characteristics and trend analysis of runoff at the source regions of the three river in Qinghai during recent years. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, (1): 52-57. (in Chinese)

41 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 过去30年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响. 地理研究, 2016, 35(1): 49-57.

Yin Y H, Wu S H, Zhao D S, et al. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the source region of the Yellow River from 1981 to 2010. Geographical Research, 2016, 35(1): 49-57. (in Chinese)

42 张岩, 张建军, 张艳得, 等. 三江源区径流长期变化趋势对降水响应的空间差异. 环境科学研究, 2017, 30(1): 40-50.

Zhang Y, Zhang J J, Zhang Y D, et al. Spatial variation of long-term runoff trends and response to precipitation change in the Three-River Headwaters Region. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(1): 40-50. (in Chinese)

43 Abouabdillah A, White M, Arnold J G, et al. Evaluation of soil and water conservation measures in a semi-arid river basin in Tunisia using SWAT. Soil Use and Management, 2015, 30(4):

539-549.

44 Yang X, Jia Z, Ci L. Assessing effects of afforestation projects in China. Nature, 2010, 466(7304): 315.

45 Li J, Liu D, Wang T, et al. Grassland restoration reduces water yield in the headstream region of Yangtze River. Scientific Reports, 2017, 7(1): 2162.

46 Shen M G, Piao S L, Jeong S-J, et al. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth. PNAS, 2015, 112(30): 9299-9304.

47 Liu J Y, Xu X L, Shao Q Q. Grassland degradation in the "three-river headwaters" region, Qinghai Province. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(3): 259-273.